

利用三粒子纠缠态建立量子隐形传态网络的探讨*

周小清[†] 邬云文

(吉首大学物理科学与信息工程学院, 吉首 416000)

(2006 年 6 月 29 日收到, 2006 年 11 月 1 日收到修改稿)

利用 W 态纠缠源可以产生三纠缠粒子, 用这些相互纠缠的粒子作为量子信道, 再辅以经典信道传送 Bell 基联合测量信息和 von Neumann 测量信息, 便可实现量子隐形传态网络. 基于上述思想, 研究了三纠缠粒子量子隐形传态网络的物理基础, 得到了基于三粒子 W 态下隐形传态的么正变换矩阵, 设计了一个基于三纠缠粒子的量子隐形传态网络, 给出了一个基于该网络的通信方案. 网络中的各站点按所述方法便可实现任意站点间的量子通信.

关键词: 量子通信, 量子隐形传态, W 态

PACC: 0365

1. 引 言

我们现在生活的时代是电子信息时代, 随着信息科学的飞速发展, 现代电子信息系统已经受到巨大的挑战, 随之而来的将是量子信息时代. 量子信息学包括量子计算和量子通信, 量子通信是以量子态作为信息单元来实现信息的有效传送. 在量子通信中, 隐形传态和密集编码是其中两种比较典型的方式. 隐形传态是利用经典辅助的方法传送未知的量子态, 而量子密集编码则是利用量子信道传送用经典比特表示的信息. 量子隐形传态最早由 Bennett 等^[1]不同国家的 6 位科学家于 1993 年联名提出, Bouwmeester 等^[2]于 1997 年利用纠缠光子对作为量子信道实现了人类历史上的第一次隐形传态. 从 1997 年到现在不过 10 年的时间里, 又有一些科学家利用不同的方法实现了量子隐形传态^[3-11].

为什么相互纠缠的两粒子分置在甲乙两地时, 不管它们相距有多远, 只要其中一个粒子的量子态发生变化, 另一个粒子的量子态就会发生相应的变化呢? 亦即为什么会发生隐形传态呢? 其中的物理原因至今仍不清楚, 但这并不影响我们对它的应用. 为有效地利用这种量子“纠缠”资源, 不少科学家一

直致力于量子纠缠的研究. 在上个世纪后期, Freedman 和 Aspect 等先后发现孪生光子对的纠缠现象^[12, 13], Cerf 等^[14]发现了原子与光子之间的纠缠现象, Rauschenbeutel 等^[15]发现了两原子间的纠缠现象, Liebfried, Ferdinand 等在 2003 年发现了双光子间、两个囚禁离子间均会产生纠缠, 并制备了量子逻辑门^[16, 17]; Blinov 等^[18]在 2004 年还发现了囚禁离子和它发出的光子间的纠缠现象从而可以制备离子-光子 Einstein-Podolsky-Rosen (EPR) 对, 邬云文等^[19]还对囚禁在 Paul 阱内的两个囚禁离子的纠缠态进行了研究并计算出了前 100 个位态. 目前通信网络远不止两个终端, 这就需要更多的粒子纠缠以提供不止两个终端的同时通信, 从而促使科学家们研究如何制备多粒子纠缠系统. 在 1999 年 Bouwmeester 等^[20]实现了三粒子纠缠, 在 2000 年 Sackett 等^[21]实现了四粒子纠缠, 我国学者潘建伟、赵志等^[22-24]也已于 2001 年在实验室实现了四粒子纠缠, 在 2004 年首次实现了五光子纠缠, 并在此基础上实现了两个独立光子的非破坏可扩展的控制非 (CNOT) 门, 利用这些 CNOT 门可以将两个原本纠缠的光子解纠缠以完成对 4 个 Bell 基的完全测量. 在 2000 年, Dürr 等^[25]还在研究三粒子纠缠时发现, 如果态的转化只通过随机性局域操作和经典通信来进行, 则可将任

* 湖南省自然科学基金(批准号 03JJY6015)和湖南省教育厅自然科学基金(批准号 06C653)资助的课题.

[†] E-mail: zhouxq_jd@163.com

意的三粒子纠缠态转换为高亮度高质量纠缠 Greenberger-Horne-Zeilinger (GHZ) 态和纠缠 W 态两种基本形式. 郑亦庄等^[26]提出了利用三个 EPR 对实现三粒子纠缠 W 态的隐形传态, 黄永畅等^[27]还利用一般 W GHZ 态导出了一般纠缠的不同 W 态. 利用这种多光子纠缠技术, 我们很容易设计出量子通信网络. 本文将利用三粒子纠缠 W 态研究 4 个 Bell 基^[28]下实现量子隐形传态网络的物理原理, 并给出一种量子隐形传态网络方案.

2. 三粒子隐形传态物理原理

为便于理论推导, 先给出 Bell 基如下^[28]:

$$|\beta_{00}\rangle = \frac{|00\rangle + |11\rangle}{\sqrt{2}}, \quad (1a)$$

$$|\beta_{01}\rangle = \frac{|01\rangle + |10\rangle}{\sqrt{2}}, \quad (1b)$$

$$|\beta_{10}\rangle = \frac{|00\rangle - |11\rangle}{\sqrt{2}}, \quad (1c)$$

$$|\beta_{11}\rangle = \frac{|01\rangle - |10\rangle}{\sqrt{2}}. \quad (1d)$$

解上述方程, 得 4 个量子态的 Bell 基表示为

$$|00\rangle = \frac{|\beta_{00}\rangle + |\beta_{10}\rangle}{\sqrt{2}}, \quad (2a)$$

$$|01\rangle = \frac{|\beta_{01}\rangle + |\beta_{11}\rangle}{\sqrt{2}}, \quad (2b)$$

$$|10\rangle = \frac{|\beta_{01}\rangle - |\beta_{11}\rangle}{\sqrt{2}}, \quad (2c)$$

$$|11\rangle = \frac{|\beta_{00}\rangle - |\beta_{10}\rangle}{\sqrt{2}}. \quad (2d)$$

2.1. 隐形传态方法

假设在甲地的 Alice 有粒子 1, 量子态为

$$|\psi\rangle_1 = a|0\rangle_1 + b|1\rangle_1, \quad (3)$$

其中 $a^2 + b^2 = 1$. 现需要将该粒子的量子态传送给在乙地的 Bob 或丙地的 Cliff, 为此必须在 Alice, Bob 和 Cliff 间建立量子信道进行通信, 方法如下:

(1) 建立量子信道(制备三粒子 W 态). 我们可利用三粒子 W 态纠缠源产生纠缠粒子 2、纠缠粒子 3 和纠缠粒子 4, 它们的纠缠态设为

$$|\psi\rangle_{234} = \frac{1}{\sqrt{3}}(|001\rangle_{234} + |010\rangle_{234} + |100\rangle_{234}). \quad (4)$$

(2) 将 $|\psi\rangle_{234}$ 中的粒子 2 传给 Alice, 粒子 3 传给 Cliff, 粒子 4 传给 Bob.

(3) Alice 将手中的粒子 1 和粒子 2 进行联合 Bell 基测量, 然后将测量结果发送到公用的经典信道上.

(4) Cliff 在公用的经典信道上收到 Alice 的测量结果后再进行 von Neumann 测量, 并将测量结果也发送到公用的经典信道上.

(5) Bob 根据 Alice 和 Cliff 的测量结果选择适当的么正变换矩阵对粒子 4 进行么正变换从而得到粒子 1 在传送前的量子态.

2.2. 理论计算

若要将粒子 1 的量子态传出去, Alice 必须进行联合 Bell 基测量. 测量前, 系统的联合量子态为

$$\begin{aligned} & |\psi\rangle_1 \otimes |\psi\rangle_{234} \\ &= (a|0\rangle_1 + b|1\rangle_1) \\ & \otimes \frac{1}{\sqrt{3}}(|001\rangle_{234} + |010\rangle_{234} + |100\rangle_{234}) \\ &= \frac{1}{\sqrt{3}}(a|00\rangle_{12}|01\rangle_{34} + a|00\rangle_{12}|10\rangle_{34} \\ & \quad + a|01\rangle_{12}|00\rangle_{34} + b|10\rangle_{12}|01\rangle_{34} \\ & \quad + b|10\rangle_{12}|10\rangle_{34} + b|11\rangle_{12}|00\rangle_{34}). \end{aligned}$$

将(2)式代入后可得

$$\begin{aligned} & |\psi\rangle_1 \otimes |\psi\rangle_{234} \\ &= \frac{1}{\sqrt{6}}[(a|01\rangle_{34} + a|10\rangle_{34} + b|00\rangle_{34})|\beta_{00}\rangle \\ & \quad + (a|00\rangle_{34} + b|01\rangle_{34} + b|10\rangle_{34})|\beta_{01}\rangle \\ & \quad + (a|01\rangle_{34} + a|10\rangle_{34} - b|00\rangle_{34})|\beta_{10}\rangle \\ & \quad + (a|00\rangle_{34} - b|01\rangle_{34} - b|10\rangle_{34})|\beta_{11}\rangle]. \quad (5) \end{aligned}$$

由(5)式可知, 将粒子 1、粒子 2 作联合 Bell 基测量后, 粒子 1 和粒子 2 的量子态将会坍缩到其中的一个 Bell 基上, 并与粒子 3、粒子 4 消纠缠. Alice 的测量结果有如下 4 种可能: $|\beta_{00}\rangle$, $|\beta_{01}\rangle$, $|\beta_{10}\rangle$ 和 $|\beta_{11}\rangle$, 每种概率均为 1/4. 下面对这 4 种情况分别进行讨论.

2.2.1. Alice 的测量结果为 $|\beta_{00}\rangle$

由(5)式知, 当 Alice 的测量结果为 $|\beta_{00}\rangle$ 时, 粒子 3、粒子 4 的量子态变为

$$|\psi\rangle_{34} = a|01\rangle_{34} + a|10\rangle_{34} + b|00\rangle_{34}. \quad (6)$$

由于粒子 3、粒子 4 仍纠缠在一起, 为使 Bob 得到粒子 1 的原量子态, 先让 Cliff 作 von Neumann 测量. 在新基底 $|x\rangle$, $|y\rangle$ 下, 粒子 3 的量子态可以分解为

$$|0\rangle_3 = \sin\theta|x\rangle_3 + \cos\theta|y\rangle_3, \quad (7a)$$

$$|1\rangle_3 = \cos\theta|x\rangle_3 - \sin\theta|y\rangle_3, \quad (7b)$$

式中 θ 为分析角. 将 (7) 式代入 (6) 式, 可得

$$|\psi_{00\ 34}\rangle = (a \sin\theta |1\ 4\rangle + a \cos\theta |0\ 4\rangle + b \sin\theta |0\ 4\rangle) |x\ 3\rangle + (a \cos\theta |1\ 4\rangle - a \sin\theta |0\ 4\rangle + b \cos\theta |0\ 4\rangle) |y\ 3\rangle. \quad (8)$$

显然, Cliff 的测量结果有两种可能, 测得 $|x\ 3\rangle$ 和 $|y\ 3\rangle$ 的概率均为 $1/2$. 测量后, Cliff 需将测量结果通过一经典线路传给 Bob, Bob 根据 Cliff 的测量结果进行一恰当的么正变换即可得到粒子 1 的量子态. 现假设 Cliff 的测量结果为 $|x\ 3\rangle$, 且取分析角 $\theta = \pi/4$. 则粒子 4 的状态为

$$|\psi_{00x\ 4}\rangle = a(|0\ 4\rangle + |1\ 4\rangle) + b|0\ 4\rangle. \quad (9)$$

由 (9) 式可得

$$U_{00x} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$U_{00x}^{-1} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix},$$

则有

$$U_{00x}^{-1} |\psi_{00x\ 4}\rangle = a|0\ 4\rangle + b|1\ 4\rangle. \quad (10)$$

经过 U_{00x}^{-1} 变换后, 粒子 4 的量子态等于粒子 1 在测量前的状态, 亦即我们成功地将粒子 1 的量子态隐形传给了粒子 4. 如果 Cliff 的测量结果为 $|y\ 3\rangle$, 则粒子 4 的量子态为

$$|\psi_{00y\ 4}\rangle = a(|1\ 4\rangle - |0\ 4\rangle) + b|0\ 4\rangle.$$

此时, Bob 还需对 $|\psi_{00y\ 4}\rangle$ 作一次么正变换, 由上式可知其么正变换矩阵为

$$U_{00y} = \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$U_{00y}^{-1} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

2.2.2. Alice 的测量结果为 $|\beta_{01}\rangle$

由 (5) 式知, 当 Alice 的测量结果为 $|\beta_{01}\rangle$ 时, 粒子 3、粒子 4 的量子态为

$$|\psi_{01\ 34}\rangle = a|11\ 34\rangle + b|00\ 34\rangle. \quad (12)$$

将 (7) 式代入 (12) 式可得

$$|\psi_{01\ 34}\rangle = (a \sin\theta |0\ 4\rangle + b \sin\theta |1\ 4\rangle + b \cos\theta |0\ 4\rangle) |x\ 3\rangle + (a \cos\theta |0\ 4\rangle + b \cos\theta |1\ 4\rangle - b \sin\theta |0\ 4\rangle) |y\ 3\rangle. \quad (13)$$

由 (13) 式可知, Cliff 的测量结果有两种可能, 即为 $|x\ 3\rangle$ 或 $|y\ 3\rangle$, 测得每种结果的概率均为 $1/2$. 若取 $\theta = \pi/4$, 当测量结果为 $|x\ 3\rangle$ 时, 粒子 4 的状态为

$$|\psi_{01x\ 4}\rangle = a|0\ 4\rangle + b(|0\ 4\rangle + |1\ 4\rangle). \quad (14)$$

此时, Bob 应作的么正变换矩阵为

$$U_{01x} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$U_{01x}^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

则有

$$U_{01x}^{-1} |\psi_{01x\ 4}\rangle = a|0\ 4\rangle + b|1\ 4\rangle. \quad (15)$$

同理可知, 当 Cliff 的测量结果为 $|y\ 3\rangle$ 时, Bob 应作的么正变换矩阵为

$$U_{01y} = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$U_{01y}^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

2.2.3. Alice 的测量结果为 $|\beta_{10}\rangle$

由 (5) 式知, 当 Alice 的测量结果为 $|\beta_{10}\rangle$ 时, 粒子 3、粒子 4 的量子态为

$$|\psi_{10\ 34}\rangle = a|01\ 34\rangle + a|10\ 34\rangle - b|00\ 34\rangle. \quad (16)$$

将 (7) 式代入 (16) 式可得

$$|\psi_{10\ 34}\rangle = (a \sin\theta |1\ 4\rangle + a \cos\theta |0\ 4\rangle - b \sin\theta |0\ 4\rangle) |x\ 3\rangle + (a \cos\theta |1\ 4\rangle - a \sin\theta |0\ 4\rangle - b \cos\theta |0\ 4\rangle) |y\ 3\rangle. \quad (17)$$

由 (17) 式可知, Cliff 的测量结果有两种可能, 即为 $|x\ 3\rangle$ 或 $|y\ 3\rangle$, 测得每种结果的概率均为 $1/2$. 若取 $\theta = \pi/4$, 当测量结果为 $|x\ 3\rangle$ 时, 粒子 4 的状态为

$$|\psi_{10x\ 4}\rangle = a(|1\ 4\rangle + |0\ 4\rangle) - b|0\ 4\rangle. \quad (18)$$

此时, Bob 应作的么正变换矩阵为

$$U_{10x} = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$U_{10x}^{-1} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix},$$

则有

$$U_{10x}^{-1} |\psi_{10x\ 4}\rangle = a|0\ 4\rangle + b|1\ 4\rangle. \quad (19)$$

同理可知, 当 Cliff 的测量结果为 $|y\ 3\rangle$ 时, Bob 应作的么正变换矩阵为

$$U_{10y} = \begin{bmatrix} -1 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$U_{10y}^{-1} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix}.$$

2.2.4. Alice 的测量结果为 $|\beta_{11}\rangle$

由 (5) 式知, 当 Alice 的测量结果为 $|\beta_{11}\rangle$ 时, 粒子 3、粒子 4 的量子态为

$$|\psi_{11\ 34}\rangle = a|00\ 34\rangle - b|01\ 34\rangle - b|10\ 34\rangle. \quad (20)$$

将 (7) 式代入 (20) 式可得

$$|\psi_{11\ 34}\rangle = (a\sin\theta|0_4 - b\sin\theta|1_4 - b\cos\theta|0_4\rangle|x_3 + (a\cos\theta|0_4 - b\cos\theta|1_4 + b\sin\theta|0_4\rangle|y_3). \quad (21)$$

由(21)式可知,Cliff的测量结果有两种可能,即为 $|x_3$ 或 $|y_3$,测得每种结果的概率均为1/2.若取 $\theta = \pi/4$,当测量结果为 $|x_3$ 时,粒子4的状态为

$$|\psi_{11x\ 4}\rangle = a|0_4 - b(|0_4 + |1_4). \quad (22)$$

此时,Bob应作的么正变换矩阵为

$$U_{11x} = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 0 & -1 \end{bmatrix},$$

$$U_{11x}^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 0 & -1 \end{bmatrix},$$

则有

$$U_{11x}^{-1}|\psi_{11x\ 4}\rangle = a|0_4 + b|1_4. \quad (23)$$

同理可知,当Cliff的测量结果为 $|y_3$ 时,Bob应作的么正变换矩阵为

$$U_{11y} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & -1 \end{bmatrix},$$

$$U_{11y}^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}.$$

2.3. Bob 的么正变换矩阵汇总

综上所述,我们可得到用 $|\psi_{234} = \frac{1}{\sqrt{3}}(|001_{234} + |010_{234} + |100_{234})$ 作量子信道时,Bob应作的么正变换为表1所列各矩阵.

表1 Bob的么正变换矩阵U和U⁻¹

Alice 测量	Cliff 测量	粒子4的量子态	U	U ⁻¹
β ₀₀	x	a 0 + b 1	$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$
	y	a 0 - b 1	$\begin{bmatrix} -1 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$
β ₀₁	x	a 1 + b 0	$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$
	y	-a 1 + b 0	$\begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$
β ₁₀	x	a 0 - b 1	$\begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}$
	y	a 0 + b 1	$\begin{bmatrix} -1 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix}$
β ₁₁	x	a 1 - b 0	$\begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$
	y	-a 1 - b 0	$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$

3. 三纠缠粒子隐形传态网络方案

对于三纠缠粒子的隐形传态,我们可设计一量子网络(图1),其中A,B,C,D和E为连接到公共信道上的5个站点,单线为量子信道,双线为经典信道,虚线为经典令牌逻辑环.环中的每一个站点都有可能发送数据,为利用上述结果,我们假定无论哪一个站点,只要发送数据,我们就称其为Alice,接收的站点称为Bob,另设一个监控站点称为Cliff.由于每一站点均有可能发送数据,那么就有可能某两个站点或所有站点均在同一时刻开始发送数据,其结果

是谁也无法发送.为避免冲突,我们规定任一时刻环中最多只能有一个令牌(图1),当某一站点想发送数据时,该站点必须等到令牌经过该站时将其抓住,然后才能开始发送数据,没有抓住令牌的站点只能等待.

为了突出量子通信的物理过程,我们假定所有的通信都是可靠的(暂不考虑校验),并约定所有帧的第1、第2两位为帧类型标志位,并约定其值与所表示的帧类型如下:00为令牌帧,01为请求帧,10为应答帧,11为测量帧.同时约定各站的地址(低三位)如下:000为空,001为A站,010为B站,011为C站,100为D站,101为E站,110为预留,111为预留.

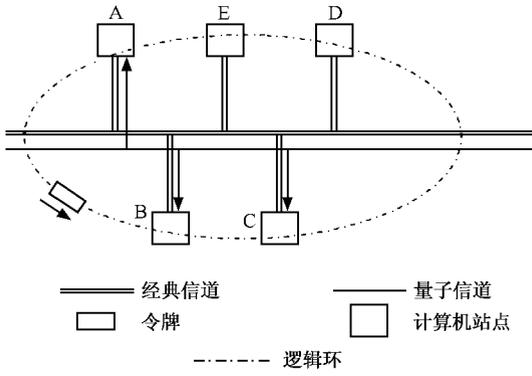


图 1 量子网络拓扑结构

3.1. 帧格式

3.1.1. 令牌

令牌帧长设为 10 bit ,其中第 1、第 2 两位的值为 00 ,第 3—第 5 三位的值为发送令牌站的源地址 ,其余位预留 ,如图 2 所示 .

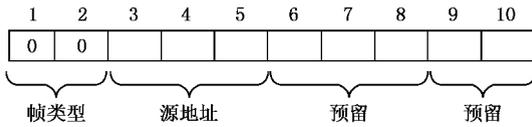


图 2 令牌格式

3.1.2. 请求帧

请求帧长设为 10 bit ,其中第 1、第 2 两位的值为 01 ,第 3—第 5 三位的值为源地址 ,第 6—第 8 三位的值为目标地址 ,第 9、第 10 两位预留给 Bob 和 Cliff 作应答位 ,并置初值为零 ,如图 3 所示 .

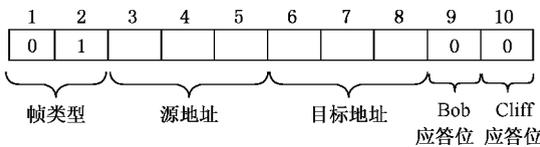


图 3 请求帧格式

3.1.3. 应答帧

应答帧长设为 10 bit ,其中第 1、第 2 两位的值为 10 ,第 3—第 5 三位的值为源地址 ,第 6—第 8 三位的值为目标地址 ,第 9、第 10 两位预留给 Bob 和 Cliff 作为应答位 ,当 Bob 和 Cliff 接收到请求帧并准备就绪时 ,分别将其对应的应答位的值置为 1 ,如图 4 所示 .

3.1.4. 测量帧

测量帧长设为 12 bit ,其中第 1、第 2 两位的值均

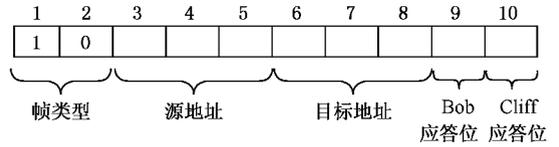


图 4 应答帧格式

为 1 ,第 3—第 5 三位的值为源地址 ,第 6—第 8 三位的值为目标地址 ,第 9、第 10 两位为 Alice 的测量结果位 ,第 11、第 12 两位为 Cliff 的测量结果位 ,如图 5 所示 .

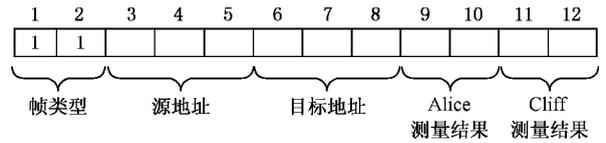


图 5 测量帧格式

Alice 测量位取值约定如下 :00 为 $|\beta_{00}\rangle$,01 为 $|\beta_{01}\rangle$,10 为 $|\beta_{10}\rangle$,11 为 $|\beta_{11}\rangle$.Cliff 测量位取值约定如下 :00 为还未测量 ,01 为 $|x\rangle$,10 为 $|y\rangle$,11 为空 .

3.1.5. 通信步骤

在以上约定的基础上 ,各站间进行的通信过程可分为生成令牌、抓住令牌、请求通信、就绪应答、开始通信、释放令牌 6 个阶段 .

3.2. 通信过程分析

所有连接到公共总线上的计算机可按其地址大小顺序组成一逻辑环 ,其中每一台计算机均存贮它的前驱和后继的地址(也可根据需要存贮环内所有计算机的地址列表) ,地址最高的计算机和地址最低的计算机在逻辑上相连 .当一计算机退出网络时 ,可将其前驱和后继的地址发送给它的后继和前驱 ,以维持逻辑环不被中断 ;当有新的计算机需入网时 ,它可发送自己的地址到总线 ,根据其地址插入环中 .以上逻辑结构可以通过环形队列或环形链表实现 .

3.2.1. 令牌的生成与维护

假设逻辑环长为 s ,令牌的传输速率为 v (光纤内传输速率为 c) ,忽略令牌长度 ,则令牌绕环运行一周的时间 τ 为

$$\tau = \frac{s}{v} \tag{24}$$

为使系统能稳定运行 ,可在环内指定一站点为监控站 (比如 C 站 ,且指定该站为 Cliff) 专门负责生成和维护令牌 .方法是该站一直负责对环内的令牌

进行侦听,当侦听时间 τ 内没有发现令牌或其他帧通过时,便可以断定令牌已丢失,则由该站再发送一令牌.

3.2.2. 抓住令牌

当某一站点需要传送数据时,等到令牌通过时将其抓住,该站设为 Alice.

3.2.3. 请求通信

Alice 抓住令牌后,将 01 写入帧类型位,将自己的地址写入源地址位、接收方的地址写入目标地址位,并将 0 写入两应答位,然后将请求帧发送出去.

3.2.4. 就绪应答

某一站点收到一帧后,首先检查帧类型位.如发现是请求帧,再检查目标地址位.若目标地址等于自己的地址,则该站为 Bob,当准备就绪后将应答位置 1,然后释放该帧.

对于监控站(Cliff),当一请求帧通过且自己准备就绪时,将应答位置 1,然后释放该帧.

3.2.5. 开始通信

当 Alice 发出的请求帧返回后,首先检查应答位.只要两应答位中有一位不为 1,则释放该帧让其继续运行;若两应答位都为 1,则可判断出 Bob 和 Cliff 均已就绪,接着进行如下操作:(1)将请求帧的第 1、第 2 位写入 11(数据帧标志),并在该帧后加入 2 bit;(2)进行联合 Bell 基测量;(3)将测量结果写入第 7、第 8 两位;(4)将数据帧发送到公共经典信道上.

Cliff(监控站)待有帧通过时,首先检查帧类型位.若该两位为 11 且目标地址不是自己的地址时,便取出第 7、第 8 两位的值作 von Neumann 测量,并

将测量结果填入第 9、第 10 两位,然后将该帧释放到公共经典信道上.

Bob 待有帧通过时,首先检查帧类型位.若该两位为 11 时再检查目标地址.若目标地址等于自己的地址时进行如下操作:检查 Cliff 的测量位是否为 00.若为 00,说明 Cliff 还没有测量,让其通过,以便 Cliff 获得该帧后进行测量.若不为 00,则根据 Alice 和 Cliff 测量位的值,在量子信道内按表 1 对应的么正变换矩阵进行么正变换,以还原量子信息.

重复以上过程,直到 Alice 发送完所有量子数据.

3.2.6. 释放令牌

Alice 在量子信道内发送完所有量子数据后,再在经典信道内释放令牌帧,通知 Bob 和 Cliff 数据发送完毕.

4. 结 论

利用 W 态纠缠源可以产生三纠缠粒子,用这些相互纠缠的粒子作为量子信道,再辅以经典网络传送 Bell 基测量信息和 von Neumann 测量信息,便可实现量子隐形传态网络,网络中的各站点按本文所述方法便可实现任意站点间的量子通信.此外,利用 von Neumann 测量的站点还可以在量子信道上对整个量子网络进行监控.由于大量的数据信息均利用量子信道传送,所以在对应的经典网络中,只需要传送令牌帧、请求帧、应答帧和测量帧,网络负担极小,现在的各种商业网络均可以胜任.

[1] Bennett C H, Brassard G, Crepeau C *et al* 1993 *Phys. Rev. Lett.* **70** 1895

[2] Bouwmeester D, Pan J W, Mattle K *et al* 1997 *Nature* **390** 575

[3] Boschi D, Brancas S, Martini F D *et al* 1998 *Phys. Rev. Lett.* **80** 1121

[4] Furusawa A, Sorensen J L, Braunstein S L *et al* 1998 *Science* **282** 706

[5] Nielsen M A, Knill E, Laflamme R 1998 *Nature* **396** 52

[6] Li Y, Zhang T C, Zhang J X *et al* 2003 *Chin. Phys.* **12** 861

[7] Ge X H, Shen Y G 2005 *Chin. Phys.* **14** 1512

[8] Zheng X J, Fang M F, Cai J W *et al* 2006 *Chin. Phys.* **15** 492

[9] Ye L, Guo G 2002 *Chin. Phys.* **11** 996

[10] Ye L, Yao C, Guo G 2001 *Chin. Phys.* **10** 1001

[11] Zheng Y, Gu Y, Guo G 2002 *Chin. Phys.* **11** 537

[12] Freedman S J, Clauser J F 1972 *Phys. Rev. Lett.* **28** 938

[13] Aspect A, Grangier P, Roger G 1981 *Phys. Rev. Lett.* **47** 460

[14] Cerf N J, Adami C 1997 *Phys. Rev. Lett.* **79** 5194

[15] Rauschenbeutel A, Nogues G, Osnaghi S *et al* 2000 *Science* **288** 2024

[16] Liebfried D, DeMarco B, Meyer V *et al* 2003 *Nature* **422** 412

[17] Ferdinand S K, Hartmut N, Mark R *et al* 2003 *Nature* **422** 408

[18] Blinov B, Moehring D L, Duan L M *et al* 2004 *Nature* **428** 153

[19] Wu Y W, Hai W H, Cai L H 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 99 (in Chinese)[郇云文、海文化、蔡丽华 2006 物理学报 **55** 99]

[20] Bouwmeester D, Pan J W, Daniell M *et al* 1999 *Phys. Rev. Lett.* **82** 1345

[21] Sackett C A, Kielpinski D, King B E *et al* 2000 *Nature* **404** 256

[22] Pan J W, Daniell M, Gasparoni S *et al* 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 4435

[23] Zhao Z, Chen Y A, Zhang A N *et al* 2004 *Nature* **430** 54

- [24] Zhao Z , Zhang A N , Chen Y A *et al* 2005 *Phys. Rev. Lett.* **94** 030501
- [25] Dür W , Vidal G , Cirac J I 2000 *Phys. Rev.* **62** 062314
- [26] Zheng Y Z , Dai L Y , Guo G C 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2678 (in Chinese) [郑亦庄、戴玲玉、郭光灿 2003 物理学报 **52** 2678]
- [27] Huang Y C , Liu M 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 4517 (in Chinese) [黄永畅、刘 敏 2005 物理学报 **54** 4517]
- [28] Clauser J F , Horne M A , Shimony A *et al* 1969 *Phys. Rev. Lett.* **23** 880

Discussion on building the net of quantum teleportation using three-particle entangled states^{*}

Zhou Xiao-Qing[†] Wu Yun-Wen

(College of Physics Science and Information Engineering , Jishou University , Jishou 416000 , China)

(Received 29 June 2006 ; revised manuscript received 1 November 2006)

Abstract

We may make three-particle entanglement using the source of three-particle W states. Put this particle entanglement down as quantum channel , and transfer information of Bell states measurement and von Neumann measurement using classical channel , the quantum teleportation net may then be realized. Based on this idea , we investigate the physical principle for building the quantum teleportation net using three-particle W states , find out the unitary transformation matrix for quantum teleportation of three-particle W states , and design a quantum teleportation net. We propose a scheme for quantum communications net and its protocol. If all stations work as schemed , quantum communications between any two stations may be realized.

Keywords : quantum communications , quantum teleportation , W states

PACC : 0365

^{*} Project supported by the Natural Science Foundation of Hunan Province , China (Grant No. 03JJY6015) and the Natural Science Foundation of the Education Bureau of Hunan Province , China (Grant No. 06C653).

[†] E-mail : zhouxq_jd@163.com